

7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАТУХАНИЯ СЕТЕВОГО ПОМЕХОПОДАВЛЯЮЩЕГО ФИЛЬТРА

Цель работы: изучить принцип действия и конструкции помехоподавляющих фильтров, определить коэффициент затухания для различных схем простейших помехоподавляющих фильтров.

Краткие сведения

Целью фильтрации в контексте ЭМС является предотвращение проникновения помех в аппаратуру или их утечки от аппаратуры по сигнальным цепям или цепям питания. Это непосредственно уменьшает уровень гальванической связи и способствует уменьшению связи посредством излучения от кабелей, снижает их восприимчивость к излучаемым помехам и позволяет ограничить опасные для изоляции и функционирования приборов напряжения помех.

Помехоподавляющие фильтры представляют собой элементы для обеспечения затухания поступающей по проводам помехи. Целесообразное их применение предполагает, что частоты полезного сигнала и помехи достаточно отличаются друг от друга. Это позволяет при соответствующих параметрах фильтра обеспечить выборочное ослабление помехи при отсутствии заметного искажения полезного сигнала.

Качество фильтра оценивают, прежде всего, по амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) или ее основным элементам: частоте и крутизне среза, коэффициенту пропускания в полосе прозрачности. По виду АЧХ различают полосовые (ПФ), режекторные (РФ), фильтры нижних (ФНЧ) и верхних (ФВЧ) частот (рис. 1).

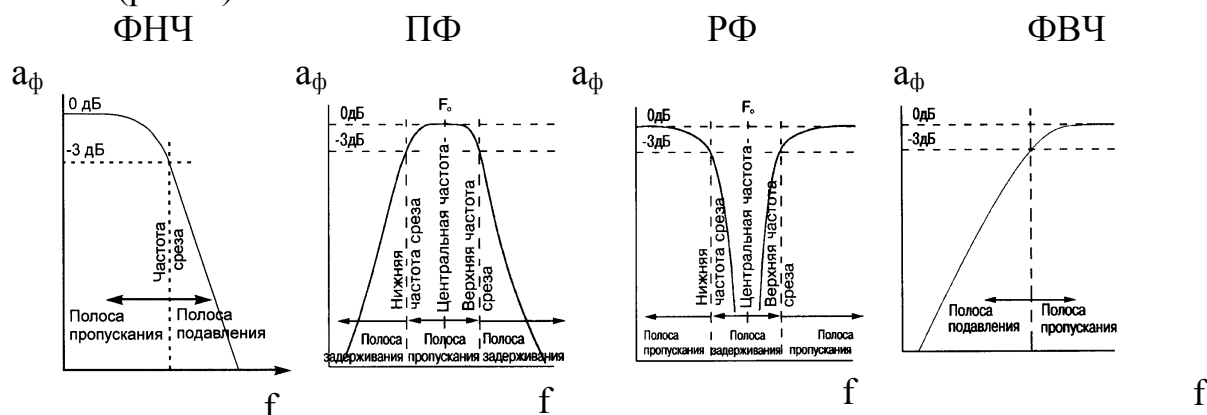


Рисунок 1. Амплитудно-частотные характеристики фильтров

Частота среза, $f_{ср}$ определяется на некотором уровне, например, 0,9 от максимального значения коэффициента пропускания. Крутизну среза определяют в децибелах при двойном отклонении от частоты среза ($0,5 f_{ср}$ для ФВЧ и $2f_{ср}$ для ФНЧ), которое называют октавой. Например, ФНЧ, имеющий $f_{ср} = 1000$ Гц и крутизну среза $a_\phi = 20$ дБ/октава на частоте 500 Гц имеет коэффициент пропускания, в 10 раз меньше, чем на частоте 2000 Гц. Для полосовых фильтров задают верхнюю и нижнюю частоты среза, для

режекторных – центральную частоту f_0 .

Все фильтры по исполнению делятся на две большие группы: пассивные и активные. Пассивные собираются из пассивных элементов – резисторов, конденсаторов и дросселей (катушек индуктивности). В активных фильтрах наряду с упомянутыми элементами используются также полупроводниковые приборы, микросхемы и схемы их питания. Активные фильтры в свою очередь делятся на аналоговые и цифровые. Достоинством активных фильтров по сравнению с пассивными является большая крутизна среза и большой коэффициент пропускания в полосе прозрачности, высокое входное и низкое выходное сопротивления.

Достижимый эффект затухания можно характеризовать коэффициентом затухания – логарифмом отношения напряжений на выходе $U_{вых}$ и входе $U_{вх}$ фильтра. Коэффициент затухания приводится, как правило, в виде логарифма отношения падения напряжений и выражается в децибелах:

$$\alpha_{\phi} = 20 \lg \left| \frac{U_{вых}}{U_{вх}} \right|. \quad (1)$$

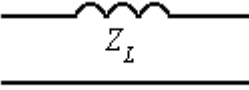
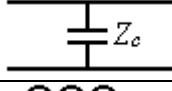
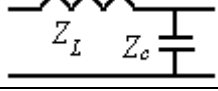
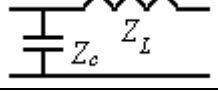
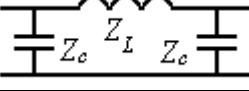
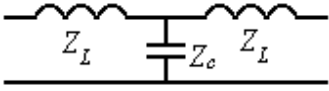
В понятиях ЭМС «фильтрация» всегда подразумевает низкочастотный фильтр, свободно пропускающий напряжение сети (полезный сигнал) и фильтрующий содержащиеся в сети высокочастотные составляющие (гармонические и образующие спектр импульсных помех). Их применение преследует две цели: во-первых, защиту устройства от помех, поступающей из сети питания, и, во-вторых, снижение уровня эмиссии возможной помехи, исходящей от прибора по проводам питания.

Обычный ФНЧ построен на двух элементах: последовательной индуктивности или сопротивлении и параллельно подключенном конденсаторе. При минимальной конфигурации фильтр содержит только один из указанных компонентов, а их комбинация сформировать LC -фильтр, T -фильтр или фильтр «П» (табл.1). Выбор индуктивности или сопротивления обычно определяется значением тока полезного сигнала, который проходит через него: для фильтров источников питания типичное значение сопротивления не превышает нескольких Ом. Преимуществом сопротивлений является их способность поглощать энергию помех и препятствовать возникновению резонансов, и, конечно, меньшая стоимость и размеры по сравнению с индуктивностью. Индуктивность, с другой стороны, может обеспечить значительный уровень полного сопротивления на высоких частотах с малыми потерями на постоянном токе низких частотах. Индуктивность обладает высоким полным сопротивлением для помех и наиболее эффективна в цепях с низким полным сопротивлением. Конденсаторы создают низкое полное сопротивление, обеспечивающее ослабление на частотах помех, и поэтому наиболее эффективны в цепях с высоким полным сопротивлением. В общем случае любой компонент позволяет достичь максимального ослабления в 40-50 дБ из-за ограничений, вносимых его паразитными параметрами, поэтому фильтры с высокими показателями строятся по многозвенной схеме.

Исходя из требований ослабления помехи и сопротивлений источника и нагрузки, между которыми должен быть фильтр производится выбор его электрической схемы. Если значения $\bar{Z}_q$ и $\bar{Z}_s$ известны приблизительно, выбор подходящей фильтровой структуры может производиться с использованием данных табл.1.

Таблица 1

Основные типы фильтров нижних частот и оценки вносимого затухания

N	Сопротивление источника, Z_q	Схема фильтра	Сопротивление приемника Z_s	Вносимое затухание
1	Мало		Мало	20 дБ/декада
2	Велико		Велико	20 дБ/декада
3	Мало		Велико	40 дБ/декада
4	Велико		Мало	40 дБ/декада
5	Велико, неизвестно		Велико, неизвестно	60 дБ/декада
6	Мало, неизвестно		Мало, неизвестно	60 дБ/декада

При этом используется следующее правило: фильтр должен быть установлен так, чтобы конденсатор был обращен к высокому сопротивлению цепи, а индуктивность – к низкому. Это связано с тем, что для получения оптимальных характеристик помехоподавления структура фильтра должна обеспечивать достижение максимального рассогласования на входе и выходе фильтра.

Поэтому при большом сопротивлении источника, первым элементом ставится конденсатор. В этом случае, когда частота помехи возрастает, реактивная составляющая S_x уменьшается, и в цепи происходит необходимое рассогласование, при котором помеха шунтируется на землю.

При малом сопротивлении источника, первым элементом должна быть индуктивность. С ростом частоты реактивная составляющая L_x увеличивается, обеспечивается рассогласование между индуктивностью и малым сопротивлением источника. Создаются условия поглощения или отражения сигнала помехи. Аналогично происходит при выборе последнего элемента фильтра.

Однако если существует вероятность выбросов тока, перенапряжений и других нестационарных процессов аппаратуре, то на входе фильтра рекомендуется ставить индуктивность, для того чтобы ослаблять

перечисленные выше процессы, обеспечивая тем самым определенную степень защиты конденсатора.

Рассмотрим каждый из приведенных в таблице типов фильтров.

Фильтр типа «С» (табл. 1, строка 1) представляет собой проходной конденсатор, шунтирующий помеху на землю.

В основном используется для ослабления паразитных высокочастотных колебаний в линиях питания постоянного тока. Рекомендуется не использовать такой фильтр в цепях, где возможны броски напряжения или нестационарные процессы, так как это может разрушить конденсатор.

Фильтр типа «LC» (табл. 1, строка 3,4) состоит из одного индуктивного и одного емкостного элемента.

Такой тип фильтра применяется в тех случаях, когда полные сопротивления источника и нагрузки значительно отличаются друг от друга. Возможны два варианта их подключения: в первом случае, когда имеется низкое сопротивление источника и высокое сопротивление нагрузки, то подключение необходимо производить, как показано в табл.1, строка 3. Если имеется высокое сопротивление источника и низкое сопротивление нагрузки, то подключение необходимо производить, как показано в табл.1, строка 4. В силу простоты конструкции, такие фильтры являются более экономичными, чем обусловлено их широкое распространение.

Фильтр типа «П» (табл.1, строка 5) состоит из двух емкостных и одного индуктивного элемента. Используется при высоких сопротивлениях источника и нагрузки.

Фильтр типа «Т» (табл.1, строка 6) состоит из двух индуктивных элементов и одного емкостного. Широко применяется в цепях, которые могут быть подвержены нестационарным процессам. Используется в цепях с низким сопротивлением источника и нагрузки, например, в источниках электропитания.

Компоненты фильтра, так же как и все другие, не идеальны. При использовании катушек индуктивности и конденсаторов для фильтрации следует иметь ввиду, что любой конденсатор с емкостью C обладает паразитной индуктивностью L_n , зависящей от длины выводов конденсатора. Она особенно велика у двухполюсных конденсаторов и мала у коаксиальных конденсаторов- вводов. Каждая катушка индуктивности в дополнение к ее индуктивности L имеет паразитную емкость C_n .

Рисунок 2 дает представление о затухании LC-фильтра с реальными элементами (рис.2а); в зависимости от диапазона частот коэффициент затухания определяется параметрами фильтра L , C или паразитными параметрами L_n , C_n . При низких частотах, когда элементы фильтра можно считать идеальными, коэффициент затухания a_ϕ увеличивается пропорционально квадрату частоты. Затем начинается сказываться влияние параметров L_n и C_n , и a_ϕ остается приблизительно неизменным. При высоких частотах эффект демпфирования в основном определяется паразитными параметрами L_n , C_n , и коэффициент a_ϕ уменьшается обратно пропорционально квадрату частоты.

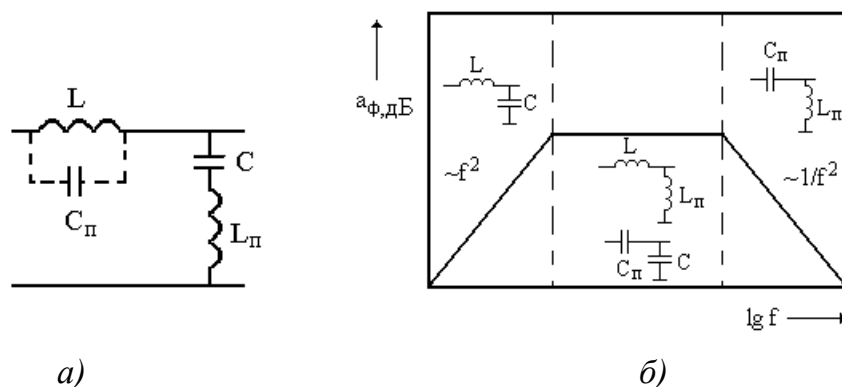


Рисунок 2. Коэффициент затухания a_ϕ фильтра LC:
 а – схема замещения фильтра; б – принципиальная частотная зависимость коэффициента затухания a_ϕ .

Расположение компонентов и монтаж фильтра

Индуктивность выводов и паразитные емкости приводят к ухудшению заданных параметров фильтров на высоких частотах. Две основные причины при применении фильтров не могут обеспечить низкоиндуктивное заземление и соединения выводов входа и выхода, расположенных близко один от другого.

Плохое заземление обуславливает общее полное сопротивление, которое уменьшается с частотой, и связь на высоких частотах усиливается из-за локального пути заземления через фильтр. Общий монтаж входа/выхода способствует этому посредством паразитной емкости или взаимной индуктивности; это также возможно при «чистом» монтаже за счет связи со стороной, где сигнал не фильтрован, через непредусмотренные пути. Выходом из положения является монтаж фильтра таким образом, чтобы его точка заземления непосредственно соединялась с низкоимпедансной землей аппаратуры, а контакты ввода/вывода должны быть разнесены и при возможности экранированы друг от друга. Наилучшим решением является расположение фильтра непосредственно на экране аппаратуры (рис.3). Ни в коем случае не допускается соединение вместе оплеток входных и выходных кабелей, подходящих к фильтру.

Расположение элементов внутри фильтра также играет существенную роль. Компоненты входа и выхода должны быть разнесены друг от друга для минимальной емкостной связи, все сигнальные и особенно проводники заземления должны быть по возможности короче и массивнее. Лучшим решением является компоновка элементов фильтра в той последовательности, как они нарисованы на принципиальной схеме. Если применяются индуктивные компоненты, то они должны быть спроектированы и расположены таким образом, чтобы магнитная связь между ними (через поля рассеяния) были минимальна; наилучшим решением является использование тороидальных сердечников.



Рисунок 3. Компоновка фильтра.

Выбор параметров конденсаторов и дросселей, применяемых в качестве элементов фильтра, производится на основании расчета фильтра.

В общем случае, фильтр любой структуры представляет собой четырехполюсник, объединяющий источник помехи и приемник.

Коэффициент затухания в фильтре любой структуры можно выразить как

$$a_{\phi} = -20 \lg \left| \frac{\bar{Z}_s}{\bar{Z}_s + \bar{Z}_o} \bar{A}_{11} + \frac{1}{\bar{Z}_s + \bar{Z}_o} \bar{A}_{12} + \frac{\bar{Z}_s \bar{Z}_o}{\bar{Z}_s + \bar{Z}_o} \bar{A}_{21} + \frac{\bar{Z}_o}{\bar{Z}_s + \bar{Z}_o} \bar{A}_{22} \right|. \quad (2)$$

где $\bar{A}_{11}, \bar{A}_{12}, \bar{A}_{21}, \bar{A}_{22}$ комплексные параметры четырехполюсника.

Для расчета простейших фильтровых структур их конкретные значения представлены в табл.2.

Коэффициент затухания в зависимости от конкретных условий может иметь сильно различающиеся значения для одного и того же фильтра. Один и тот же фильтр при различных условиях, т.е. в зависимости от значения и частотных характеристик полных сопротивлений источника $\bar{Z}_o$ и приемника $\bar{Z}_s$ может вызвать сильно различающееся затухание. Поэтому практически невозможно задать общую характеристику фильтра независимо от конкретных условий. Фактическая эффективность фильтра определяется лишь экспериментально в соответствии с (1) или же расчетным путем согласно (2), если точно известно соотношение полных сопротивлений $\bar{Z}_o$ и $\bar{Z}_s$.

Аппаратура для измерений

Источником синусоидального сигнала является генератор ГЗ-33. Он генерирует синусоидальное напряжение частотой от 20 Гц до 0,2 МГц.

Регистрация напряжения осуществляется цифровым осциллографом, подключенным к компьютеру.

В качестве модели сетевого помехоподавляющего фильтра используется набор элементов L и C , позволяющий соединить схемы помехоподавляющих фильтров, приведенные в табл.1 (рис.4). Кроме этого измеряется коэффициент затухания у промышленного сетевого фильтра КФ-220-500D, который применяется для подавления импульсных помех в промышленной сети.

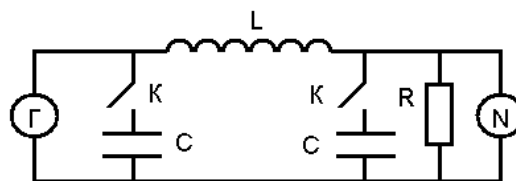


Рисунок 4. Схема анализа простейших фильтровых структур.
 Γ - генератор синусоидальных импульсов ГЗ-33, K - переключатели, L, C - индуктивности и конденсаторы фильтра; R - сопротивление нагрузки, N - цифровой осциллограф.

Таблица 2

Параметры четырехполюсников простейших схем фильтров

Схема	Коэффициент			
	$\bar{A}_{11}$	$\bar{A}_{12}$	$\bar{A}_{21}$	$\bar{A}_{22}$
	1	$\bar{Z}_L$	0	1
	1	0	$\frac{1}{\bar{Z}_C}$	1
	$1 + \frac{\bar{Z}_L}{\bar{Z}_C}$	$\bar{Z}_L$	$\frac{1}{\bar{Z}_C}$	1
	1	$\bar{Z}_L$	$\frac{1}{\bar{Z}_C}$	$1 + \frac{\bar{Z}_L}{\bar{Z}_C}$
	$1 + \frac{\bar{Z}_L}{\bar{Z}_{2C}}$	$\bar{Z}_L$	$\frac{1}{\bar{Z}_{1C}} + \frac{1}{\bar{Z}_{2C}} + \frac{\bar{Z}_L}{\bar{Z}_{1C}\bar{Z}_{2C}}$	$1 + \frac{\bar{Z}_L}{\bar{Z}_{1C}}$
	$1 + \frac{\bar{Z}_{1L}}{\bar{Z}_C}$	$\bar{Z}_{1L} + \bar{Z}_{2L} \frac{\bar{Z}_{1L}\bar{Z}_{2L}}{\bar{Z}_C}$	$\frac{1}{\bar{Z}_C}$	$1 + \frac{\bar{Z}_{2L}}{\bar{Z}_C}$

Порядок работы

1. Собрать схему фильтра согласно таб.1.
2. Для выбранной схемы фильтра измерить амплитуды сигнала на входе U_0 и выходе фильтра U_ϕ для 5–6 значений частоты. Результаты занести в табл.3.
3. Повторить измерения по п.2 для других схем фильтра.
4. По формуле (1) рассчитать экспериментальный коэффициент затухания фильтра $a_\phi^{эсп}$.
5. По формуле (2) рассчитать коэффициент затухания «идеального» фильтра $a_\phi^{расч}$. Данные для расчета: Z_q , Ом; Z_s , Ом; C , мкФ; L , Гн; выбираются из условий эксперимента.
6. Построить расчетные и экспериментальные зависимости $a_\phi = f(\lg f)$. По

экспериментальным графикам определить частоту среза фильтра.

7. Проанализировать полученные результаты.

8. Ответить на контрольные вопросы.

Таблица 3

№ п/п	f , Гц	$U_{вх}$, В	$U_{вых}$, В	$a_{\phi}^{эсп}$, дБ	$a_{\phi}^{расч}$, дБ		Примечание
							Схема фильтра
							$f_{ср} =$ Гц

Контрольные вопросы

1. Когда возможно применение помехоподавляющих фильтров?
2. В чем заключается принцип действия помехоподавляющих фильтров?
3. От каких факторов зависит коэффициент затухания фильтра?
4. Описать порядок выбора схемы фильтра и параметров элементов L и C .